

# Trostupanjski vertikalni reduktor s uparenim zupčanicima

---

Štimac, Davor

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:783321>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI VERTIKALNI REDUKTOR S UPARENIM  
ZUPČANICIMA / THREE-STAGE VERTICAL REDUCTION  
GEAR WITH PAIRED GEARS**

Rijeka, rujan 2023.

Davor Štimac

0069083164

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**TROSTUPANJSKI VERTIKALNI REDUKTOR S UPARENIM  
ZUPČANICIMA / THREE-STAGE VERTICAL REDUCTION  
GEAR WITH PAIRED GEARS**

Mentor: doc.dr.sc Željko Vrcan

Rijeka, rujan 2023.

Davor Štimac

0069083164

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**  
Predmet: **Elementi strojeva II**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Davor Štimac (0069083164)**  
Studij: **Stručni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Trostupanjski vertikalni reduktor s uparenim zupčanicima / Three-stage vertical reduction gear with paired gears**


### Opis zadatka:

Projektirati trostupanjski vertikalni reduktor za primjenu u industriji, s kosim ozubljenjem. Zupčanicu svih stupnjeva izvode se kao upareni. Pogonski stroj je elektromotor snage 550 kW pri 1785 min<sup>-1</sup>. Prijenosni omjer  $i = 24$ . Trajnost ležajeva iznosi minimalno 12000 sati. Temperatura okoline iznosi najviše 50°C. Proračunati sve bitne elemente reduktora, izabrati ulje za podmazivanje, odrediti potreban način podmazivanja zupčanika i ležajeva te način hlađenja ulja. Izraditi sklopni nacrt reduktora i radioničke nacрте u dogovoru s mentorima.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


*Rov 14*  
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

  
Izv. prof. dr. sc. Željko Vrcan

  
Izv. prof. dr. sc. Kristina Marković  
(komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

## IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod nazivom Trostupanjski vertikalni reduktor s uparenim zupčanicima, pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Željko Vrcan.

Rijeka, rujan 2023.

Davor Štimac

0069083164



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	5
<b>2. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA REDUKTORA</b> .....	6
<b>2.1. Parametri zadani zadatkom</b> .....	6
<b>2.2. Određivanje prijenosnog omjera</b> .....	6
<b>2.3. Određivanje brzine vrtnje</b> .....	7
<b>2.4. Prijenosni moment po vratilima</b> .....	8
<b>3. PRORAČUN PRVOG STUPNJA REDUKTORA</b> .....	9
<b>3.1. Projektni proračun za prvi stupanj reduktora</b> .....	9
3.1.1. Razmak osi zupčastog para .....	9
3.1.2. Izbor modula.....	10
3.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika.....	11
3.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika .....	11
3.1.5. Točan prijenosni omjer .....	11
3.1.6. Diobeni promjeri.....	12
3.1.7. Teoretski razmak osi .....	13
3.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika.....	13
3.1.9. Stupanj prekrivanja profila .....	14
3.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku .....	14
3.1.11. Suma faktora pomaka profila .....	15
3.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku .....	16
3.1.13. Promjeri preko korijena zuba .....	17
3.1.14. Promjeri preko glave zuba.....	17
3.1.15. Promjeri temeljnih krugova .....	18
3.1.16. Promjeri pogonskih krugova .....	18
3.1.17. Stupanj prekrivanja profila .....	19
3.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku .....	20
<b>3.2. Kontrolni proračun za prvi stupanj reduktora</b> .....	23
3.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika .....	23
3.2.2. Sigurnost na pitting .....	25
3.2.3. Nosivost korijena zuba.....	25

3.2.4. Sigurnost protiv loma.....	27
<b>3.3. Izbor ulja za podmazivanje .....</b>	<b>29</b>
3.3.1. Stribeckov pritisak .....	29
<b>4. PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Projektni proračun za drugi stupanj reduktora .....</b>	<b>30</b>
4.1.1. Razmak osi zupčastog para .....	30
4.1.2. Izbor modula.....	31
4.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika.....	32
4.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika .....	32
4.1.5. Točan prijenosni omjer .....	32
4.1.6. Diobeni promjeri.....	33
4.1.7. Teoretski razmak osi.....	33
4.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika.....	34
4.1.9. Stupanj prekrivanja profila .....	34
4.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku .....	34
4.1.11. Suma faktora pomaka profila .....	35
4.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku .....	36
4.1.13. Promjeri preko korijena zuba .....	37
4.1.14. Promjeri preko glave zuba.....	38
4.1.15. Promjeri temeljnih krugova.....	38
4.1.16. Promjeri pogonskih krugova .....	39
4.1.17. Stupanj prekrivanja profila .....	39
4.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku .....	40
<b>4.2. Kontrolni proračun za drugi stupanj reduktora .....</b>	<b>42</b>
4.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika .....	42
4.2.2. Sigurnost na pitting .....	44
4.2.3. Nosivost korijena zuba.....	45
4.2.4. Sigurnost protiv loma.....	46
<b>4.3. Izbor ulja za podmazivanje .....</b>	<b>48</b>
4.3.1. Stribeckov pritisak .....	48
<b>5. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora .....</b>	<b>49</b>
5.1.1. Razmak osi zupčastog para .....	49

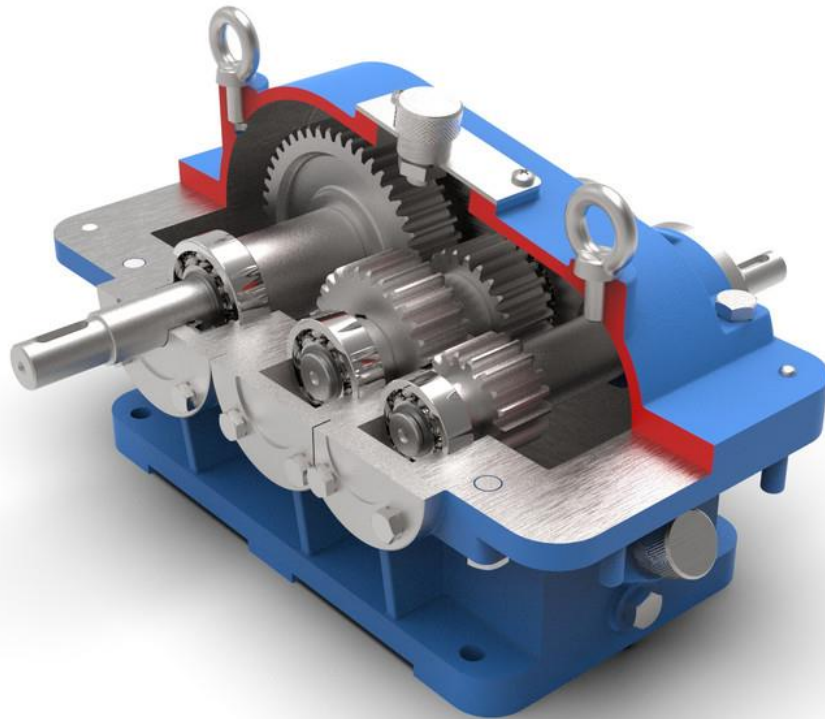


5.1.2. Izbor modula.....	50
5.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika.....	51
5.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika .....	51
5.1.5. Točan prijenosni omjer .....	51
5.1.6. Diobeni promjeri.....	52
5.1.7. Teoretski razmak osi.....	52
5.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika.....	53
5.1.9. Stupanj prekrivanja profila.....	53
5.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku .....	53
5.1.11. Suma faktora pomaka profila .....	54
5.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku .....	55
5.1.13. Promjeri preko korijena zuba .....	56
5.1.14. Promjeri preko glave zuba.....	56
5.1.15. Promjeri temeljnih krugova .....	57
5.1.16. Promjeri pogonskih krugova .....	57
5.1.17. Stupanj prekrivanja profila .....	58
5.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku.....	58
<b>5.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora .....</b>	<b>61</b>
5.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika .....	61
5.2.2. Sigurnost na pitting.....	62
5.2.3. Nosivost korijena zuba.....	63
5.2.4. Sigurnost protiv loma.....	65
<b>5.3. Izbor ulja za podmazivanje .....</b>	<b>66</b>
5.3.1. Stribeckov pritisak .....	66
<b>6. PROMJERI VRATILA.....</b>	<b>67</b>
<b>6.1. Vratilo 1 .....</b>	<b>67</b>
<b>6.2. Vratilo 2 .....</b>	<b>68</b>
<b>6.3. Vratilo 3 .....</b>	<b>69</b>
<b>6.4. Vratilo 4 .....</b>	<b>70</b>
<b>7. IZBOR LEŽAJEVA .....</b>	<b>71</b>
<b>7.1. Vratilo 1 .....</b>	<b>71</b>
<b>7.2. Vratilo 2 .....</b>	<b>72</b>
<b>7.3. Vratilo 3 .....</b>	<b>73</b>

<b>7.4. Vratilo 4</b> .....	74
<b>8. IZBOR PERA</b> .....	75
<b>8.1. Vratilo 1</b> .....	75
<b>8.2. Vratilo 2</b> .....	76
<b>8.3. Vratilo 3</b> .....	77
<b>8.4. Vratilo 4</b> .....	78
<b>9. POSTUPAK KONSTRUIRANJA REDUKTORA</b> .....	79
<b>10. ZAKLJUČAK</b> .....	80
<b>11. Popis literature</b> .....	81
<b>12. Sažetak</b> .....	82
<b>13. Summary</b> .....	82
<b>14. Prilozi</b> .....	83

## 1. UVOD

Reduktor je uređaj kojem je glavni cilj smanjenje broja ulaznih okretaja na željeni broj izlaznih. Moguće su razne varijante reduktora koji mogu biti remenski, zupčasti i dr. Također mogu biti izvedeni s raznim oblicima kućišta, a to su vertikalni i horizontalni. Prijenos se vrši u stupnjevima. Tako možemo razlikovati jednostupanjske, dvostupanjske i višestupanjske. Prijenosni omjer je uvijek veći od jedan. U tom slučaju broj okretaja po stupnjevima se smanjuje, a zakretni moment se povećava. Na ulazno vratilo priključujemo razne izvore koji mogu biti elektromotorni, benzinski ili dizel motor i slično, a priključni strojevi na izlazu po potrebi. Njegova primjena može biti razna.



*Slika 1.1. Reduktor [GrabCAD Community]*

## 2. ODREĐIVANJE OSNOVNIH PARAMETARA REDUKTORA

Najvažniji parametri za proračun reduktora koje moramo izračunati jesu snaga, moment, broj okretaja po vratilima i prijenosni omjer. Nakon dobivanja istih možemo krenuti sa proračunom reduktora po stupnjevima.

### 2.1. Parametri zadani zadatkom

Snaga na ulaznom vratilu 1:  $P_1 = 550 \text{ kW}$

Prijenosni omjer:  $i_{z1} = 24$

Ulazni broj okretaja:  $n_1 = 1785 \text{ min}^{-1}$

Trajnost ležajeva:  $L \geq 12000\text{h}$

Temperatura okoline:  $T = 50 \text{ °C}$

Ozubljenje: Koso

### 2.2. Određivanje prijenosnog omjera

Prijenosni omjer koji nam je zadan u zadatku iznosi  $i=24$ . Potreban prijenosni omjer za proračun dobiti ćemo kao treći korijen iz zadanog, odnosno ukupnog. Nakon uvrštavanja u zadanu formulu dobivamo sljedeći prijenosni omjer:

$$i_1 = i_2 = i_3 = \sqrt[3]{i} = \sqrt[3]{24} = 2,88$$

### 2.3. Određivanje brzine vrtnje

Brzina vrtnje pogonskog odnosno ulaznog vratila jednaka je:

$$n_1 = 1785 \text{ min}^{-1}$$

Gonjeno vratilo 1. stupnja:

$$n_2 = \frac{n_1}{i_1}$$

$$n_2 = \frac{1785}{2,88}$$

$$n_2 = 619,792 \text{ min}^{-1}$$

Gonjeni zupčanici prvog stupnja i pogonski zupčanici drugog stupnja nalaze se na istom vratilu, pa je njihova brzina vrtnje jednaka.

Gonjeno vratilo 2. stupnja:

$$n_4 = \frac{n_3}{i_1}$$

$$n_4 = \frac{619,792}{2,88}$$

$$n_4 = 215,205 \text{ min}^{-1}$$

Gonjeni zupčanici drugog stupnja i pogonski zupčanici trećeg stupnja nalaze se na istom vratilu, pa je njihova brzina vrtnje jednaka.

Gonjeno vratilo 3. stupnja:

$$n_5 = \frac{n_4}{i_3}$$

$$n_5 = \frac{215,205}{2,88}$$

$$n_5 = 74,724 \text{ min}^{-1}$$

## 2.4. Prijenosni moment po vratilima

Ulazni moment:

$$T_1 = \frac{P_1}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60}}$$

$$T_1 = \frac{550 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{1785}{60}}$$

$$T_1 = 2943,9 \text{ Nm}$$

Momente na pojedinim vratilima računamo po sljedećim formulama:

$$T_2 = T_1 \cdot i$$

$$T_2 = 2943,9 \cdot 2,88$$

$$T_2 = 8475 \text{ Nm}$$

$$T_3 = T_1 \cdot i^2$$

$$T_3 = 2943,9 \cdot 2,88^2$$

$$T_3 = 24410 \text{ Nm}$$

$$T_4 = T_1 \cdot i^3$$

$$T_4 = 2943,9 \cdot 2,88^3$$

$$T_4 = 70302 \text{ Nm}$$

### 3. PRORAČUN PRVOG STUPNJA REDUKTORA

#### 3.1. Projektni proračun za prvi stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5421 (18CrNi8), a ima sljedeće karakteristike:

- tvrdoća boka zuba: 61 HRC
- dinamička tvrdoće boka zuba:  $\sigma_{Hlim} = 1500 \text{ N/mm}^2$
- dinamička tvrdoća korijena zuba:  $\sigma_{Fe} = 930 \text{ N/mm}^2$
- toplinska obrada: cementacija + kaljenje

##### 3.1.1. Razmak osi zupčastog para

Ulazni moment na prvom vratilu iznosi 2943,9Nm, ali u obzir uzimamo 60% vrijednosti iz sigurnosnih razloga. Moment iznosi 1765Nm iz razloga što na vratilu imamo dva zupčanika.

$$a \geq K_2 (i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_1}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left( \frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 2,88 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{2,88}{20} = 0,644 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_V = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$K_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1500 - \text{dinamička tvrdoće boka zuba}$$

Razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(2,88+1) \sqrt[3]{\frac{1765}{0,644} \cdot \frac{2,88+1}{2,88} 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1500}\right)^2}$$

$$a \geq 197,6879 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 200 \text{ mm}$$

### 3.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{250 \cdot 2,88}{(1+2,88)^2}$$

$$m_n = 3,826 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 1. prioriteta:

$$m_n = 4 \text{ mm}$$



### 3.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Formula je sljedeća:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos\beta}{m(i_z+1)}$$

$\beta$  -nagib zuba i iznosi  $\beta = 18^\circ$ :

$$z_1 = \frac{2 \cdot 200 \cos 18^\circ}{4(2,88+1)}$$

$$z_1 = 24,51$$

$z_1 = 24$  – usvojen prvi manji cijeli broj

### 3.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 24 \cdot 2,88$$

$$z_2 = 69,12$$

$z_2 = 70$  – usvojen veći cijeli broj

### 3.1.5. Točan prijenosni omjer

Formula za točan prijenosni omjer:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{70}{24}$$

$$u = i = 2,916$$

Odstupanje od  $i_z$ :

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{2,88}{2,916}$$

$$\Delta i = 0,0123 < 0,025$$

3.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{4 \cdot 24}{\cos 18^\circ}$$

$$d_1 = 100,9403 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{4 \cdot 70}{\cos 18^\circ}$$

$$d_2 = 294,4094 \text{ mm}$$

### 3.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{100,9403 + 294,4094}{2}$$

$$a_d = 197,6748 \text{ mm}$$

$$a_d < a, a - a_d = (0...5)$$

$$a - a_d = 200 - 197,6748 = 2,3252 \text{ mm}$$

### 3.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,644 \cdot 100,9403$$

$$b = b_2 = 65,005 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 65 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2...10)$$

$$b_1 = 65 + 5$$

$$b_1 = 70 \text{ mm}$$

### 3.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{65 \sin 18^{\circ}}{\pi \cdot 2,88}$$

$$\varepsilon_{\beta} = 2,221$$

### 3.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

$$\text{za } \alpha_n = 20^{\circ},$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^{\circ}}{\cos 18^{\circ}}\right)$$

$$\alpha_t = 20,9418^{\circ}$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos \alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{197,6879}{200} \cdot \cos 20,9418^{\circ}\right)$$

$$\alpha_{wt} = 22,6094^{\circ}$$

### 3.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 22,6094^\circ - \frac{\pi \cdot 22,6094^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,0220439$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 20,9418^\circ - \frac{\pi \cdot 20,9418^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,0173809$$

Suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,0220439 - 0,0173809}{2\tan 20^\circ} (24 + 70) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,6021 < 1,5$$

### 3.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1+x_2}{2} + \frac{[1-(x_1+x_2)]\ln u}{2\ln\left(\frac{Z_{n1}Z_{n2}}{100}\right)}$$

Kako bi dobili vrijednost  $x_1$ , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a dobivaju se formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2\beta_b \cos\beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2\beta_b \cos\beta}$$

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin\beta \cdot \cos\alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 18^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 0,005$$

ekvivalentni broj zuba:

$$Z_{n1} = \frac{24}{\cos^2 0,005 \cos 18^\circ}$$

$$Z_{n1} = 24,000$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 69,984$$

Dobivamo sljedeću vrijednost:

$$x_1 = \frac{0,6021}{2} + \frac{[1-(0,6021)]\ln 2,916}{2\ln\left(\frac{24 \cdot 69,984}{100}\right)}$$

$$x_1 = 0,3765$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = 0,6021 - 0,3765$$

$$x_2 = 0,2256$$

### 3.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left( \frac{z_1}{\cos\beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 4 \left( \frac{24}{\cos 18^\circ} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 93,952 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left( \frac{z_2}{\cos\beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 4 \left( \frac{70}{\cos 18^\circ} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 286,214 \text{ mm}$$

### 3.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 200 - 286,214$$

$$d_{a1} = 113,786 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 113 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 200 - 93,952$$

$$d_{a2} = 306,048 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 306 \text{ mm}$$

### 3.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t$$

$$d_{b1} = 100,9403 \cdot \cos 20,9418^\circ$$

$$d_{b1} = 94,2725 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 294,4094 \cdot \cos 20,9418^\circ$$

$$d_{b2} = 274,9618 \text{ mm}$$

### 3.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1+1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 200}{2,88+1}$$

$$d_{w1} = 103,0927 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 200 - 103,0927$$

$$d_{w2} = 296,9073 \text{ mm}$$



### 3.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Računa se prema formuli:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

potrebno je izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{4}{\cos 18^\circ}$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{113^2 - 94,2725^2} + \sqrt{306^2 - 274,9618^2} - 2 \cdot 200 \cdot \sin 22,6094^\circ}{2\pi \cdot 4,2058 \cdot \cos 20,9418^\circ}$$

$\varepsilon_{\alpha} = 1,74 > 1,1$  – za kose zube

### 3.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left( \frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{94,2725}{113}$$

$$\alpha_{at1} = 33,46^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left( \frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left( \frac{113}{100,9403} \tan(18^\circ) \right)$$

$$\beta_{a1} = 19,9883^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 33,46^\circ - \frac{\pi \cdot 33,46^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,07719$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an1} = 119 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,3765 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 24} + 0,01738 - 0,07719 \right) \cdot \cos 19,9883^\circ$$

$$S_{an1} = 1,90407 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Formula za debljinu vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left( \frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{274,9618}{306}$$

$$\alpha_{at2} = 26,0295^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left( \frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left( \frac{306}{294,4094} \tan 18^\circ \right)$$

$$\beta_{a2} = 18,6604^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 26,0295^\circ - \frac{\pi \cdot 26,0295^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,03429$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an2} = 306 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,2256 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 70} + 0,01738 - 0,03429 \right) \cdot \cos 18,6604^\circ$$

$$S_{an2} = 2,28 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

### 3.2. Kontrolni proračun za prvi stupanj reduktora

#### 3.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktni pritisak na bokovima spregnutih zupčanika računa se prema formuli:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\varepsilon \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik:

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone:

$$Z_H = \frac{1}{\cos\alpha_t} \sqrt{\frac{2\cos\beta_b}{\tan\alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,9418^\circ)} \sqrt{\frac{2\cos(16,88)}{\tan(22,6094^\circ)}} = 2,2958$$

Faktor nagiba zuba:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos\beta} = \sqrt{\cos(18^\circ)} = 0,97522$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,74}} = 0,7580$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 1765}{100,9403} = 34971,166 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{100,9403 \cdot 1785}{19100} = 9,433 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 6$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 6^2 \cdot 9,433 \cdot 24 \cdot 10^{-5} = 1,0815$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left( \frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b =$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \cdot \left( \frac{65}{100,9403} \right) + 0,0005 \cdot 65$$

$$K_{H\beta} = 1,3184$$

Hertzov pritisak iznosi:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,3464 \cdot 0,97522 \cdot 0,7580 \sqrt{\frac{34971,16}{65 \cdot 100,9403} \cdot \frac{2,88+1}{2,88}} \cdot 1 \cdot 1,0815 \cdot 1,1 \cdot 1,3184$$

$$\sigma_H = 1084,775 \text{ Mpa}$$

### 3.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5420

$$\sigma_{Hlim} = 1500 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1500}{1084,775} 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,383 > 1,1$$

### 3.2.3. Nosivost korijena zuba

Formula za naprezanje na savijanje:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3\beta} = \frac{24}{\cos^3(18^\circ)} = 27,899$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,3765^2 + \frac{7,63}{27,899} - 15,94 \cdot \frac{0,3765}{27,899}$$

$$Y_{FS1} = 4,164$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3\beta} = \frac{70}{\cos^3(18^\circ)} = 81,372$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,2256^2 + \frac{7,63}{81,372} - 15,94 \cdot \frac{0,2256}{81,372}$$

$$Y_{FS2} = 4,14$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \beta}{120} = 1 - \frac{2,221 \cdot 18^\circ}{120} = 0,667$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2\beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(18^\circ)}{1,74} = 0,6398$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$



Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,282$$

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{34971,166}{70 \cdot 4} 4,164 \cdot 0,667 \cdot 0,6398 \cdot 1,5 \cdot 1,0815 \cdot 1,1 \cdot 1,282$$

$$\sigma_{F1} = 507,728 \text{ Mpa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{34971,166}{65 \cdot 4} 4,164 \cdot 0,667 \cdot 0,6398 \cdot 1,5 \cdot 1,0815 \cdot 1,1 \cdot 1,282$$

$$\sigma_{F2} = 546,784 \text{ MPa}$$

### 3.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_\delta Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4 \dots 2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 930 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zarez

$$Y_\delta = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{930}{507,728} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 1,778 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{930}{546,784} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 1,7 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

### 3.3. Izbor ulja za podmazivanje

#### 3.3.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3F_t i_1 + 1}{bd_1 i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 34971,166 \cdot 2,88 + 1}{70 \cdot 100,940 \cdot 2,88}$$

$$k_s = 20,004 \text{ MPa}$$

Viskoznost ulja:

$$v_{40} = 208 \left( \frac{k_s}{v_1} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 208 \left( \frac{20,004}{9,433} \right)^{0,418}$$

$$v_{40} = 284,791 \text{ mm}^2/\text{s}$$

## 4. PRORAČUN DRUGOG STUPNJA REDUKTORA

### 4.1. Projektni proračun za drugi stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5421, isti kao i kod prvog para.

#### 4.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment  $T_2 = 4719,4$  Nm formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2 (i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_2}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left( \frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$i_z = 2,88$  – prijenosni omjer

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,644 \text{ – faktor širine zupčanika}$$

$K_A = 1,5$  – faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja

$K_v = 1,1$  – faktor dodatnih dinamičkih opterećenja

$K_{H\alpha} = 1,1$  – faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$K_{H\beta} = 1,12$  – faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba

$S_{Hmin} = 1,1$  – minimalna sigurnost na pitting

$\sigma_{Hlim} = 1500$  – dinamička tvrdoće boka zuba

Razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(2,88+1) \sqrt[3]{\frac{5085}{0,644} \cdot \frac{2,88+1}{2,88} 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1500}\right)^2}$$

$$a \geq 281,295 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 315 \text{ mm}$$

#### 4.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{315 \cdot 2,88}{(1+2,88)^2}$$

$$m_n = 6,026 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 2. prioriteta:

$$m_n = 7 \text{ mm}$$

#### 4.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Formula je sljedeća:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos\beta}{m(i_z+1)}$$

$\beta$  -nagib zuba i iznosi  $\beta = 18^\circ$ :

$$z_1 = \frac{2 \cdot 315 \cos 18^\circ}{7(2,88+1)}$$

$$z_1 = 22,06$$

$z_1 = 22$  – usvojen prvi manji cijeli broj

#### 4.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 22 \cdot 2,88$$

$$z_2 = 63,36$$

$z_2 = 63$  usvojen manji cijeli broj

#### 4.1.5. Točan prijenosni omjer

Formula za točan prijenosni omjer:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{63}{22}$$

$$u = i = 2,863$$

Odstupanje od  $i_z$  dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{2,88}{2,863}$$

$$\Delta i = 0,005 < 0,025$$

4.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{7 \cdot 22}{\cos 18^\circ}$$

$$d_1 = 161,92 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{7 \cdot 63}{\cos 18^\circ}$$

$$d_2 = 463,69 \text{ mm}$$

4.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{161,92 + 463,69}{2}$$

$$a_d = 312,805 \text{ mm}$$

$$a_d < a, \quad a - a_d = (0 \dots 5)$$

$$a - a_d = 315 - 312,805 = 2,195 \text{ mm}$$

#### 4.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,644 \cdot 161,92$$

$$b = b_2 = 104,276 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 105 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2 \dots 10)$$

$$b_1 = 105 + 5$$

$$b_1 = 110 \text{ mm}$$

#### 4.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{105 \sin 18^\circ}{\pi \cdot 7}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,476$$

#### 4.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

$$\text{za } \alpha_n = 20^\circ,$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 18^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,941^\circ$$



Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos\alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{312,805}{315} \cdot \cos 20,941^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 21,961^\circ$$

4.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = \tan 21,961^\circ - \frac{\pi \cdot 21,961^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{wt} = 0,020137$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = \tan 20,941^\circ - \frac{\pi \cdot 20,941^\circ}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_t = 0,017378$$

Suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,020137 - 0,0174}{2\tan 20^\circ} (22 + 63) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 0,3195 < 1,5$$

#### 4.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1+x_2}{2} + \frac{[1-(x_1+x_2)] \ln u}{2 \ln \left( \frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Kako bi dobili vrijednost  $x_1$ , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a dobivaju se formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 18^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 16,88$$

ekvivalentni broj zuba:

$$Z_{n1} = \frac{22}{\cos^2 16,88 \cos 18^\circ}$$

$$Z_{n1} = 25,26$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 25,26 \cdot 2,863$$

$$Z_{n2} = 72,32$$

Dobivamo sljedeću vrijednost:

$$x_1 = \frac{0,3195}{2} + \frac{[1-(0,3195)] \ln 2,863}{2 \ln \left( \frac{25,26 \cdot 72,32}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,283$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = 0,037$$

4.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left( \frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 7 \left( \frac{22}{\cos 18^\circ} + 2 \cdot 0,283 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 148,387 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left( \frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 7 \left( \frac{63}{\cos 18^\circ} + 2 \cdot 0,037 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 446,712 \text{ mm}$$

#### 4.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 315 - 446,712$$

$$d_{a1} = 180,02 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 180 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 315 - 148,387$$

$$d_{a2} = 478,215 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 478 \text{ mm}$$

#### 4.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t$$

$$d_{b1} = 161,92 \cdot \cos 20,941^\circ$$

$$d_{b1} = 151,225 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 463,69 \cdot \cos 20,941^\circ$$

$$d_{b2} = 433,062 \text{ mm}$$

#### 4.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1+1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 315}{2,88+1}$$

$$d_{w1} = 162,371 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 315 - 162,371$$

$$d_{w2} = 467,62 \text{ mm}$$

#### 4.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Računa se prema formuli:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

potrebno je izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{7}{\cos 18^\circ}$$

$$m_t = 7,360$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{180^2 - 151,225^2} + \sqrt{478^2 - 433,062^2} - 2 \cdot 315 \cdot \sin 21,961^\circ}{2\pi \cdot 7,36 \cdot \cos 20,941^\circ}$$

$$\varepsilon_\alpha = 1,490 > 1,1 \text{ – za kose zube}$$

#### 4.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left( \frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{151,225}{180}$$

$$\alpha_{at1} = 32,8452^\circ$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left( \frac{d_{a1}}{d_1} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan \left( \frac{180}{161,92} \tan(18^\circ) \right)$$

$$\beta_{a1} = 19,8597^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan \alpha_{at1} - \frac{\pi \alpha_{at1}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = \tan 32,8452^\circ - \frac{\pi \cdot 32,8452^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at1} = 0,072606$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an1} = 180 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,283 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 22} + 0,017378 - 0,072606 \right) \cdot \cos 19,8597^\circ$$

$$S_{an1} = 2,30058 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Debljina vrha zuba za gonjeni zupčanik:

$$S_{an2} = d_{a2} \left( \frac{\pi + 4x_2 \tan \alpha_n}{2z_2} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at2} \right) \cos \beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{433,062}{478}$$

$$\alpha_{at2} = 25,0433^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left( \frac{d_{a2}}{d_2} \tan \beta \right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan \left( \frac{478}{463,69} \tan 18^\circ \right)$$

$$\beta_{a2} = 18,5181^\circ$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan \alpha_{at2} - \frac{\pi \alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = \tan 25,0433^\circ - \frac{\pi \cdot 25,0433^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv} \alpha_{at2} = 0,030361$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an2} = 478 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,037 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 63} + 0,01743 - 0,030361 \right) \cdot \cos 18,5181^\circ$$

$$S_{an2} = 4,2426 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

## 4.2. Kontrolni proračun za drugi stupanj reduktora

### 4.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktни притисак на бокovima спрегнутих зупчаника рачуна се према формули:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{bd_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos\alpha_t} \sqrt{\frac{2\cos\beta_b}{\tan\alpha_{wt}}}$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos(20,941^\circ)} \sqrt{\frac{2\cos(16,88)}{\tan(21,961^\circ)}}$$

$$Z_H = 2,3845$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos\beta} = \sqrt{\cos(18^\circ)} = 0,97522$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{1,778}} = 0,81923$$



Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 5085}{161,92} = 62808,794 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1,5$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{161,92 \cdot 619}{19100} = 5,247 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprezanja

$$Q = 7$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = 1 + 7^2 \cdot 5,247 \cdot 22 \cdot 10^{-5}$$

$$K_v = 1,056$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left( \frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b$$

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left( \frac{105}{161,92} \right) + 0,0005 \cdot 105$$

$$K_{H\beta} = 1,3392$$

Hertzov pritiak iznosi:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,3845 \cdot 0,97522 \cdot 0,82 \sqrt{\frac{62808,749}{105 \cdot 161,92} \cdot \frac{2,88+1}{2,88}} \cdot 1 \cdot 1,0565 \cdot 1,1 \cdot 1,3392$$

$$\sigma_H = 1007,865 \text{ Mpa}$$

#### 4.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{Hmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{Hmin} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5421

$$\sigma_{Hlim} = 1500 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1500}{1129,457} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,489 > 1,1$$

### 4.2.3. Nosivost korijena zuba

Formula za naprezanje na savijanje:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{bm_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{22}{\cos^3(18^\circ)} = 25,574$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,283^2 + \frac{7,63}{25,26} - 15,94 \cdot \frac{0,283}{25,26}$$

$$Y_{FS1} = 4,2178$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{62}{\cos^3(18^\circ)} = 72,073$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,0285^2 + \frac{7,63}{72,073} - 15,94 \cdot \frac{0,0285}{72,073}$$

$$Y_{FS2} = 4,1797$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_\beta = 1 - \frac{\epsilon_\beta \beta}{120} = 1 - \frac{1,476 \cdot 18^\circ}{120} = 0,7786$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_{\varepsilon} = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(18^\circ)}{1,778} = 0,6315$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,3006$$

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{62808,749}{110 \cdot 7} 4,2128 \cdot 0,7786 \cdot 0,6315 \cdot 1,5 \cdot 1,0565 \cdot 1,1 \cdot 1,3006$$

$$\sigma_{F1} = 255,214 \text{ Mpa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{62808,749}{105 \cdot 7} 4,1797 \cdot 0,7786 \cdot 0,6315 \cdot 1,5 \cdot 1,0565 \cdot 1,1 \cdot 1,3006$$

$$\sigma_{F2} = 267,367 \text{ Mpa}$$

#### 4.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_{\delta} Y_R Y_X \geq S_{F\min}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4 \dots 2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 930 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zareze

$$Y_{\delta} = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_x = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{930}{255,214} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 3,644 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{930}{267,367} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 3,378 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

### 4.3. Izbor ulja za podmazivanje

#### 4.3.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3F_t i_1 + 1}{bd_1 i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 62808,749 \cdot 2,88 + 1}{105 \cdot 161,92 \cdot 2,88}$$

$$k_s = 14,931 \text{ MPa}$$

Viskoznost ulja:

$$\nu_{40} = 208 \left( \frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left( \frac{14,931}{5,247} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 322,039 \text{ mm}^2/\text{s}$$

## 5. PRORAČUN TREĆEG STUPNJA REDUKTORA

### 5.1. Projektni proračun za treći stupanj reduktora

Materijal koji će se koristiti za izradu zupčanika je Č5421, isti kao i kod prvog i drugog para.

#### 5.1.1. Razmak osi zupčastog para

Za poznati ulazni moment  $T_3 = 14646 \text{ Nm}$  formula za izračun razmaka osi glasi:

$$a \geq K_2 (i_z + 1) \sqrt[3]{\frac{T_3}{\psi_{bd}} \cdot \frac{i_z + 1}{i_z} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \left( \frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hmin}} \right)^2}$$

Pri čemu je:

$$K_2 = 320$$

$$i_z = 2,88 - \text{prijenosni omjer}$$

$$\psi_{bd} = 0,5 + \frac{i_z}{20} = 0,5 + \frac{4,16}{20} = 0,644 - \text{faktor širine zupčanika}$$

$$K_A = 1,5 - \text{faktor primjene ovisan o kombinaciji pogonskog i radnog stroja}$$

$$K_V = 1,1 - \text{faktor dodatnih dinamičkih opterećenja}$$

$$K_{H\alpha} = 1,1 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu}$$

$$K_{H\beta} = 1,12 - \text{faktor raspodjele opterećenja uzduž zuba}$$

$$S_{Hmin} = 1,1 - \text{minimalna sigurnost na pitting}$$

$$\sigma_{Hlim} = 1500 - \text{dinamička tvrdoće boka zuba}$$

Razmak osi veći ili jednak:

$$a \geq 320(2,88+1) \sqrt[3]{\frac{14646}{0,644} \cdot \frac{2,88+1}{2,88} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,12 \left(\frac{1,1}{1500}\right)^2}$$

$$a \geq 400,225 \text{ mm}$$

Usvajamo standardni razmak osi:

$$a = 400 \text{ mm}$$

### 5.1.2. Izbor modula

Za kose zube sa tvrdim i cementiranim bokovima formula glasi:

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{a \cdot i_z}{(1+i_z)^2}$$

$$m_n = 0,1 \cdot \frac{400 \cdot 2,88}{(1+2,88)^2}$$

$$m_n = 7,65 \text{ mm}$$

Usvajamo standardnu vrijednost 1. prioriteta:

$$m_n = 8 \text{ mm}$$



### 5.1.3. Broj zubi pogonskog zupčanika

Formula je sljedeća:

$$z_1 = \frac{2a \cdot \cos\beta}{m(i_z+1)}$$

$\beta$  -nagib zuba i iznosi  $\beta = 18^\circ$ :

$$z_1 = \frac{2 \cdot 400 \cos 18^\circ}{8(2,88+1)}$$

$$z_1 = 24,511$$

$z_1 = 24$  – usvojen prvi manji cijeli broj

### 5.1.4. Broj zubi gonjenog zupčanika

$$z_2 = z_1 \cdot i_1$$

$$z_2 = 24 \cdot 2,88$$

$$z_2 = 69,12$$

$z_2 = 69$  – usvojen cijeli broj

### 5.1.5. Točan prijenosni omjer

Formula za točan prijenosni omjer:

$$u = i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$u = i = \frac{69}{24}$$

$$u = i = 2,875$$

Odstupanje od  $i_z$  dobivamo:

$$\Delta i = 1 - \frac{i_z}{i}$$

$$\Delta i = 1 - \frac{2,88}{2,875}$$

$$\Delta i = -0,00173 < 0,025$$

5.1.6. Diobeni promjeri

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta}$$

$$d_1 = \frac{8 \cdot 24}{\cos 18^\circ}$$

$$d_1 = 201,88 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta}$$

$$d_2 = \frac{8 \cdot 69}{\cos 18^\circ}$$

$$d_2 = 580,407 \text{ mm}$$

5.1.7. Teoretski razmak osi

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$a_d = \frac{201,88 + 580,407}{2}$$

$$a_d = 391,1435 \text{ mm}$$

$$a_d < a, \quad a - a_d = (0 \dots 5)$$

$$a - a_d = 400 - 391,1435 = 8,8565 \text{ mm}$$

### 5.1.8. Širina pogonskog i gonjenog zupčanika

$$b = b_2 = \psi_{bd} \cdot d_1$$

$$b = b_2 = 0,644 \cdot 201,88$$

$$b = b_2 = 130,010 \text{ mm}$$

$$b = b_2 = 130 \text{ mm} - \text{usvojeno}$$

$$b_1 = b_2 + (2 \dots 10)$$

$$b_1 = 130 + 5$$

$$b_1 = 135 \text{ mm}$$

### 5.1.9. Stupanj prekrivanja profila

Stupanj prekrivanja profila iznosi:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \sin \beta}{\pi \cdot m_n}$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{130 \sin 18^\circ}{\pi \cdot 8}$$

$$\varepsilon_\beta = 1,599$$

### 5.1.10. Zahvatni kut na diobenom promjeru i pogonski zahvatni kut u čeonom presjeku

Zahvatni kut za kose zube iznosi:

$$\text{za } \alpha_n = 20^\circ,$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\right)$$

$$\alpha_t = \arctan\left(\frac{\tan 20^\circ}{\cos 18^\circ}\right)$$

$$\alpha_t = 20,941^\circ$$

Pogonski zahvatni kut iznosi:

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{a_d}{a} \cos\alpha_t\right)$$

$$\alpha_{wt} = \arccos\left(\frac{391,1435}{400} \cdot \cos 20,941^\circ\right)$$

$$\alpha_{wt} = 24,0399^\circ$$

5.1.11. Suma faktora pomaka profila

Vrijedi da je:

$$x_1 + x_2 = \frac{\operatorname{inv}\alpha_{wt} - \operatorname{inv}\alpha_t}{2\tan\alpha_n} (z_1 + z_2) < 1,5$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{wt} = \tan\alpha_{wt} - \frac{\pi\alpha_{wt}}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{wt} = \tan 24,0399^\circ - \frac{\pi \cdot 24,0399^\circ}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{wt} = 0,02670$$

$$\operatorname{inv}\alpha_t = \tan\alpha_t - \frac{\pi\alpha_t}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_t = \tan 20,941^\circ - \frac{\pi \cdot 20,941^\circ}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_t = 0,017378$$

Suma faktora pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = \frac{0,0267 - 0,017378}{2\tan 20^\circ} (24 + 69) < 1,5$$

$$x_1 + x_2 = 1,191 < 1,5$$

### 5.1.12. Raspodjela sume faktora pomaka profila prema MAAG postupku

Računa se prema formuli:

$$x_1 = \frac{x_1+x_2}{2} + \frac{[1-(x_1+x_2)] \ln u}{2 \ln \left( \frac{Z_{n1} Z_{n2}}{100} \right)}$$

Kako bi dobili vrijednost  $x_1$ , potrebno je izračunati ekvivalentan broj zuba za oba zupčanika, a dobivaju se formulama:

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^2 \beta_b \cos \beta}$$

Kut nagiba boka zuba na temeljnom krugu:

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n)$$

$$\beta_b = \arcsin(\sin 18^\circ \cdot \cos 20^\circ)$$

$$\beta_b = 16,88$$

ekvivalentni broj zuba:

$$Z_{n1} = \frac{24}{\cos^2 16,88 \cos 18^\circ}$$

$$Z_{n1} = 27,557$$

$$Z_{n2} = Z_{n1} \cdot u$$

$$Z_{n2} = 79,235$$

Dobivamo sljedeću vrijednost:

$$x_1 = \frac{1,191}{2} + \frac{[1-(1,191)] \ln 2,875}{2 \ln \left( \frac{27,56 \cdot 79,235}{100} \right)}$$

$$x_1 = 0,5627$$

$$x_2 = (x_1 + x_2) - x_1$$

$$x_2 = 0,629$$

5.1.13. Promjeri preko korijena zuba

$$d_{f1} = m_n \left( \frac{z_1}{\cos \beta} + 2x_1 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 8 \left( \frac{24}{\cos 18^\circ} + 2 \cdot 0,562 - 2,5 \right)$$

$$d_{f1} = 190,872 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = m_n \left( \frac{z_2}{\cos \beta} + 2x_2 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 8 \left( \frac{69}{\cos 18^\circ} + 2 \cdot 0,629 - 2,5 \right)$$

$$d_{f2} = 570,471 \text{ mm}$$

5.1.14. Promjeri preko glave zuba

$$d_{a1} = 2a - d_{f2}$$

$$d_{a1} = 2 \cdot 400 - 570,471$$

$$d_{a1} = 229,529 \text{ mm, Usvajamo } d_{a1} = 229 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 2a - d_{f1}$$

$$d_{a2} = 2 \cdot 400 - 190,872$$

$$d_{a2} = 609,128 \text{ mm, Usvajamo } d_{a2} = 609 \text{ mm}$$

#### 5.1.15. Promjeri temeljnih krugova

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t$$

$$d_{b1} = 201,88 \cdot \cos 20,941^\circ$$

$$d_{b1} = 188,545 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t$$

$$d_{b2} = 580,407 \cdot \cos 20,941^\circ$$

$$d_{b2} = 542,07 \text{ mm}$$

#### 5.1.16. Promjeri pogonskih krugova

$$d_{w1} = \frac{2a}{i_1 + 1}$$

$$d_{w1} = \frac{2 \cdot 400}{2,88 + 1}$$

$$d_{w1} = 206,185 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = 2a - d_{w1}$$

$$d_{w2} = 2 \cdot 400 - 206,185$$

$$d_{w2} = 593,815 \text{ mm}$$

### 5.1.17. Stupanj prekrivanja profila

Računa se prema formuli:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - 2a \sin \alpha_{wt}}{2\pi m_t \cdot \cos \alpha_t}$$

potrebno je izračunati kosi modul:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$$

$$m_t = \frac{8}{\cos 18^\circ}$$

$$m_t = 8,411$$

pa dobivamo,

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{229^2 - 188,545^2} + \sqrt{609^2 - 542,07^2} - 2 \cdot 400 \cdot \sin 24,0399^\circ}{2\pi \cdot 8,411 \cdot \cos 20,941^\circ}$$

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,654 > 1,1 - \text{za kose zube}$$

### 5.1.18. Debljina vrha zuba u normalnom presjeku

Formula za debljinu vrha zuba za pogonski zupčanik:

$$S_{an1} = d_{a1} \left( \frac{\pi + 4x_1 \tan \alpha_n}{2z_1} + \text{inv} \alpha_t - \text{inv} \alpha_{at1} \right) \cos \beta_{a1}$$

Kut zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika:

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{d_{b1}}{d_{a1}}$$

$$\alpha_{at1} = \arccos \frac{188,545}{229}$$

$$\alpha_{at1} = 34,579^\circ$$



$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{d_{a1}}{d_1} \tan\beta\right)$$

$$\beta_{a1} = \arctan\left(\frac{229}{201,88} \tan(18^\circ)\right)$$

$$\beta_{a1} = 20,2322^\circ$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at1} = \tan\alpha_{at1} - \frac{\pi\alpha_{at1}}{180}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at1} = \tan 34,579^\circ - \frac{\pi \cdot 34,579^\circ}{180^\circ}$$

$$\operatorname{inv}\alpha_{at1} = 0,086101$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an1} = 229 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,562 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 24} + 0,017378 - 0,0861 \right) \cdot \cos 20,2322^\circ$$

$$S_{an1} = 2,952 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

$$S_{an2} = d_{a2} \left( \frac{\pi + 4x_2 \tan\alpha_n}{2z_2} + \operatorname{inv}\alpha_t - \operatorname{inv}\alpha_{at2} \right) \cos\beta_{a2}$$

Kut zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika:

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{d_{b2}}{d_{a2}}$$

$$\alpha_{at2} = \arccos \frac{542,07}{609}$$

$$\alpha_{at2} = 27,114^\circ$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{d_{a2}}{d_2} \tan\beta\right)$$

$$\beta_{a2} = \arctan\left(\frac{609}{580,407} \tan 18^\circ\right)$$

$$\beta_{a2} = 18,8256^\circ$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan\alpha_{at2} - \frac{\pi\alpha_{at2}}{180}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = \tan 27,114^\circ - \frac{\pi \cdot 27,114^\circ}{180^\circ}$$

$$\text{inv}\alpha_{at2} = 0,03904$$

Debljina vrha zuba jednaka je:

$$S_{an2} = 609 \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot 0,629 \cdot \tan 20^\circ}{2 \cdot 69} + 0,017378 - 0,03904 \right) \cdot \cos 18,825^\circ$$

$$S_{an2} = 4,33966 \text{ mm} > 0,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

## 5.2. Kontrolni proračun za treći stupanj reduktora

### 5.2.1 Hertzov pritisak na bokovima spregnutih zupčanika

Kontaktни притисак на бокovima спрегнутих зупчаника рачуна се према формули:

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\beta Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \frac{i+1}{i} K_A K_V K_{H\alpha} K_{H\beta}}$$

Pri čemu su:

Faktor modula elastičnosti za čelik

$$Z_E = 190 \sqrt{\text{Mpa}}$$

Faktor zone

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \sqrt{\frac{2 \cos \beta_b}{\tan \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos(20,941^\circ)} \sqrt{\frac{2 \cos(16,88)}{\tan(24,0399^\circ)}} = 2,217$$

Faktor nagiba zuba

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos(18^\circ)} = 0,97522$$

Faktor utjecaja prekrivanja

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a}} = \sqrt{\frac{1}{2,953}} = 0,7775$$

Tangencijalna sila

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_1} = \frac{2000 \cdot 14646}{201,88} = 145096,09 \text{ N}$$

Faktor primjene

$$K_A = 1$$

Obodna brzina

$$v_1 = \frac{d_1 n_1}{19100} = \frac{201,88 \cdot 215}{19100} = 2,272 \text{ m/s}$$

Faktor dodatnih dinamičkih naprežanja

$$Q = 8$$

$$K_v = K_{v\beta} = 1 + Q^2 v_1 z_1 \cdot 10^{-5} = 1 + 8^2 \cdot 2,272 \cdot 24 \cdot 10^{-5} = 1,03489$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž para zuba u zahvatu

$$K_{H\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{H\beta} = 1,17 + 0,18 \left( \frac{b}{d_1} \right) + 0,0005b = 1,285$$

Hertzov pritisak iznosi:

$$\sigma_H = 190 \cdot 2,341 \cdot 0,97522 \cdot 0,581 \sqrt{\frac{145096,09}{130 \cdot 201,88} \cdot \frac{2,88+1}{2,88}} \cdot 1 \cdot 1,03489 \cdot 1,1 \cdot 1,285$$

$$\sigma_H = 1018,834 \text{ Mpa}$$

### 5.2.2. Sigurnost na pitting

Sigurnost na pitting se računa prema formuli:

$$S_H = \frac{\sigma_{H\text{lim}}}{\sigma_H} Z_L Z_V Z_R Z_X Z_W > S_{H\text{min}}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost na pitting

$$S_{H\text{min}} = 1,1$$

Trajna dinamička čvrstoća za Č5421

$$\sigma_{H\text{lim}} = 1500 \text{ Mpa}$$

Tribomehanički faktor

$$Z_{LVR} = 1$$

Faktor povećanja tvrdoće

$$Z_w = 1$$

Faktor utjecaja veličine

$$Z_x = 1$$

Zatim dobivamo da je:

$$S_H = \frac{1500}{1018,834} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 > 1,1$$

$$S_H = 1,472 > 1,1$$

### 5.2.3. Nosivost korijena zuba

Formula za naprezanje na savijanje:

$$\sigma_F = \frac{F_t}{b m_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\epsilon K_A K_V K_{F\alpha} K_{F\beta}$$

Pri čemu su:

Faktor zahvata na vrhu zuba pogonskog zupčanika

$$Z_{n1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{24}{\cos^3(18^\circ)} = 27,8992$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18x_1^2 + \frac{7,63}{Z_{n1}} - 15,94 \frac{x_1}{Z_{n1}}$$

$$Y_{FS1} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,562^2 + \frac{7,63}{27,8992} - 15,94 \cdot \frac{0,562}{27,8992}$$

$$Y_{FS1} = 3,219$$

Faktor zahvata na vrhu zuba gonjenog zupčanika

$$Z_{n2} = \frac{z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{69}{\cos^3(18^\circ)} = 80,210$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18x_2^2 + \frac{7,63}{Z_{n2}} - 15,94 \frac{x_2}{Z_{n2}}$$

$$Y_{FS2} = 4,08 + 0,18 \cdot 0,629^2 + \frac{7,63}{80,210} - 15,94 \cdot \frac{0,629}{80,210}$$

$$Y_{FS2} = 3,443$$

Faktor kuta nagiba

$$Y_\beta = 1 - \frac{\varepsilon_\beta \beta}{120} = 1 - \frac{1,599 \cdot 18^\circ}{120} = 0,7601$$

Faktor stupnja prekrivanja profila

$$Y_\varepsilon = 0,25 + 0,75 \frac{\cos^2 \beta}{\varepsilon_a} = 0,25 + 0,75 \cdot \frac{\cos^2(18^\circ)}{1,654} = 0,695$$

Faktor raspodjele opterećenja na par zuba u zahvatu

$$K_{F\alpha} = 1,1$$

Faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{0,9} = 1,2531$$

Naprezanje na savijanje za pogonski zupčanik

$$\sigma_{F1} = \frac{145096,09}{130 \cdot 8} 4,167 \cdot 0,7601 \cdot 0,4797 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,2531$$

$$\sigma_{F1} = 482,112 \text{ Mpa}$$

Naprezanje na savijanje za gonjeni zupčanik

$$\sigma_{F2} = \frac{145096,09}{130 \cdot 8} \cdot 4,1371 \cdot 0,7601 \cdot 0,4797 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,281$$

$$\sigma_{F2} = 478,653 \text{ Mpa}$$

#### 5.2.4. Sigurnost protiv loma

Sigurnost protiv loma se računa prema formuli:

$$S_F = \frac{\sigma_{FE}}{\sigma_F} Y_\delta Y_R Y_X \geq S_{Fmin}$$

Pri čemu su:

Minimalna sigurnost

$$S_{Fmin} \geq 1,4 \dots 2$$

Dinamička čvrstoća korijena zuba

$$\sigma_{FE} = 930 \text{ N/mm}^2$$

Faktor osjetljivosti materijala na zareze

$$Y_\delta = 1$$

Utjecaj hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba

$$Y_R = 1$$

Faktor veličine zupčanika

$$Y_X = 1$$

Sigurnost protiv loma za pogonski zupčanik:

$$S_{F1} = \frac{930}{482,112} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F1} = 1,929 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

Sigurnost protiv loma za gonjeni zupčanik:

$$S_{F2} = \frac{930}{478,653} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \geq 1,4$$

$$S_{F2} = 1,942 \geq 1,4 - \text{zadovoljava uvjet}$$

### 5.3. Izbor ulja za podmazivanje

5.3.1. Stribeckov pritisak

$$k_s = \frac{3F_t i_1 + 1}{bd_1 i_1}$$

$$k_s = \frac{3 \cdot 145096,09 \cdot 2,88 + 1}{130 \cdot 201,88 \cdot 2,88}$$

$$k_s = 22,344 \text{ MPa}$$

Viskoznost ulja:

$$\nu_{40} = 208 \left( \frac{k_s}{\nu_1} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 208 \left( \frac{22,244}{2,272} \right)^{0,418}$$

$$\nu_{40} = 539,783 \text{ mm}^2/\text{s}$$



## 6. PROMJERI VRATILA

### 6.1. Vratilo 1

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_1}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt1}}{10 \dots 12}, R_{dt1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{10}$$

$$\tau_{dop} = 30,00 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr1} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 2943,9}{\pi \cdot 30}}$$

$$d_{vr1} = 79,3714 \text{ mm}$$

Usvajamo  $d_{vr1} = 85 \text{ mm}$

## 6.2. Vratilo 2

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_2}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12}$ ,  $R_{dt-1}$  – vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)

$$\tau_{dop} = \frac{300}{10}$$

$$\tau_{dop} = 30 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr2} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 4719,4}{\pi \cdot 34}}$$

$$d_{vr2} = 112,9110 \text{ mm}$$

Usvajamo  $d_{vr2} = 118 \text{ mm}$

### 6.3. Vratilo 3

Minimalni promjer vratila dobivamo po formuli:

$$d_{vr3} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot T_3}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12}, R_{dt-1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{10}$$

$$\tau_{dop} = 30 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr3} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot 24410}{\pi \cdot 30}}$$

$$d_{vr3} = 156,4453 \text{ mm}$$

Usvajamo  $d_{vr3} = 160 \text{ mm}$

#### 6.4. Vratilo 4

Minimalni promjer vratila 4 dobivamo po formuli:

$$d_{vr4} = \sqrt[3]{\frac{16000 \cdot T_4}{\pi \cdot \tau_{dop}}}$$

pri čemu je,

$$\tau_{dop} = \frac{R_{dt-1}}{10 \dots 12}, R_{dt-1} - \text{vrijednost izmjenične dinamičke čvrstoće (odabrano iz tablice)}$$

$$\tau_{dop} = \frac{300}{10}$$

$$\tau_{dop} = 30 \text{ N/mm}^2$$

pa iz toga slijedi da je:

$$d_{vr4} = \sqrt[3]{\frac{1600 \cdot 70302}{\pi \cdot 30}}$$

$$d_{vr4} = 228,5663 \text{ mm}$$

Usvajamo  $d_{vr4} = 232 \text{ mm}$

## 7. IZBOR LEŽAJEVA

### 7.1. Vratilo 1

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_1}{d_{w1}} \text{ – obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 2943}{103,0927}$$

$$F_{wt} = 57094,246 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 57094,246 \cdot \tan(22,6094)$$

$$F_r = 23777,031 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = \frac{200}{197,6748} \cdot \tan(18^\circ)$$

$$\tan \beta_w = 0,328741$$

pa je:

$$F_a = 57094,246 \cdot 0,328741$$

$$F_a = 18769,21952 \text{ N}$$

## 7.2. Vratilo 2

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_2}{d_{w2}} \text{ – obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 8475}{162,371}$$

$$F_{wt} = 104390,562 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 57094,246 \cdot \tan(21,961)$$

$$F_r = 42093,665 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = \frac{315}{312,805} \cdot \tan(18^\circ)$$

$$\tan \beta_w = 0,327199$$

pa je:

$$F_a = 104390,246 \cdot 0,327199$$

$$F_a = 34156,303 \text{ N}$$

### 7.3. Vratilo 3

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_3}{d_{w3}} \text{ -- obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 24410}{206,185}$$

$$F_{wt} = 236777,651 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 236777,651 \cdot \tan(22,689)$$

$$F_r = 98992,828 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = \frac{400}{395,1435} \cdot \tan(18^\circ)$$

$$\tan \beta_w = 0,328913$$

pa je:

$$F_a = 236777,651 \cdot 0,328913$$

$$F_a = 77879,247 \text{ N}$$

#### 7.4. Vratilo 4

Ležaje biramo pomoći sljedećih formula:

Formula za radijalnu silu glasi:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha_{wt}$$

pri čemu je:

$$F_{wt} = \frac{2T_4}{d_{w4}} \text{ – obodna sila}$$

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot 70302}{206,185}$$

$$F_{wt} = 236777,651 \text{ N}$$

pa slijedi da je:

$$F_r = 57094,246 \cdot \tan(22,689)$$

$$F_r = 98992,828 \text{ N}$$

Formula za aksijalnu silu glasi:

$$F_a = F_{wt} \cdot \tan \beta_w$$

pri čemu je:

$$\tan \beta_w = \frac{a}{a_d} \cdot \tan \beta$$

$$\tan \beta_w = \frac{400}{395,1435} \cdot \tan(18^\circ)$$

$$\tan \beta_w = 0,328913$$

pa je:

$$F_a = 236777,651 \cdot 0,328913$$

$$F_a = 77879,247 \text{ N}$$



## 8. IZBOR PERA

### 8.1. Vratilo 1

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

$l$  – duljina pera

$d$  – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

$T$  – moment za zadano vratilo

$h$  – visina pera

$t_1$  – dubina utora pera u vratilu

$p_{dop}$  – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice),  $p_{dop} = 180$  Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 2943}{85 \cdot (14 - 9) \cdot 180}$$

$$l \geq 76,941 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 25 \text{ mm}$$

$$h = 14 \text{ mm}$$

$$t_1 = 9 \text{ mm}$$

$$t_2 = 5,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 70 - 280 \text{ mm}$$

## 8.2. Vratilo 2

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

$l$  – duljina pera

$d$  – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

$T$  – moment za zadano vratilo

$h$  – visina pera

$t_1$  – dubina utora pera u vratilu

$p_{dop}$  – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice),  $p_{dop} = 180$  Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 8475}{118 \cdot (18-11) \cdot 180}$$

$$l \geq 114,003 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 32 \text{ mm}$$

$$h = 18 \text{ mm}$$

$$t_1 = 11 \text{ mm}$$

$$t_2 = 7,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 90 - 360 \text{ mm}$$

### 8.3. Vratilo 3

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

$l$  – duljina pera

$d$  – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

$T$  – moment za zadano vratilo

$h$  – visina pera

$t_1$  – dubina utora pera u vratilu

$p_{dop}$  – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice),  $p_{dop} = 180$  Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 24410}{160 \cdot (22-13) \cdot 180}$$

$$l \geq 188,348 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$h = 22 \text{ mm}$$

$$t_1 = 13 \text{ mm}$$

$$t_2 = 9,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 110 - 400 \text{ mm}$$

#### 8.4. Vratilo 4

Formula za proračun pera glasi:

$$l < 0,8d,$$

pri čemu je:

$l$  – duljina pera

$d$  – nazivni promjer vratila

Dužina pera se računa prema formuli:

$$l \geq \frac{2000T}{d(h-t)p_{dop}},$$

pri čemu je:

$T$  – moment za zadano vratilo

$h$  – visina pera

$t_1$  – dubina utora pera u vratilu

$p_{dop}$  – dopušteni pritisak na udarno opterećenje (bira se iz tablice),  $p_{dop} = 180$  Mpa

$$l \geq \frac{2000 \cdot 70302}{232 \cdot (32-20) \cdot 180}$$

$$l \geq 280,579 \text{ mm}$$

Usvajamo standardne vrijednosti iz priručnika:

$$b = 56 \text{ mm}$$

$$h = 32 \text{ mm}$$

$$t_1 = 20 \text{ mm}$$

$$t_2 = 12,4 \text{ mm}$$

$$l_1 = 160 - 400 \text{ mm}$$

## 9. POSTUPAK KONSTRUIRANJA REDUKTORA

Prvi korak prilikom izrade reduktora bio je dobivanje prijenosnog omjera, broja okretaja po pojedinim vratilima, te prijenosnog momenta za pojedino vratilo. Reduktor je zadan kao trostupanjski sa uparenim zupčanicima što znači da sadrži 4 vratila, a u svakom stupnju po 4 zupčanika, odnosno po 2 uparena. Svaki smo stupanj računali pojedinačno. Svaki stupanj sadrži projektni i kontrolni proračun kako bi se zadovoljili svi parametri. Osim toga ujedno smo računali i promjere vratila (uz odabir materijala za izradu), a po dobivenim vrijednostima odabirali ležajeve s obzirom na radijalno i aksijalno opterećenje i uložna pera tako da se može prenijeti određen moment..

Kako bi zadovoljili uvjete uložnih pera morali smo na svako vratilo dodati 2 kraća (zupčanik je uži od potrebne duljine uložnog pera) pod kutem od 120 stupnjeva.

Zbog same izvedbe cijelog reduktora, u ovom slučaju vertikalni, morali smo riješiti problem podmazivanja. U idealnom slučaju svi zupčanici i ležajevi bili bi potopljeni u ulju što u ovom slučaju nije moguće jer je samo donji dio reduktora, odnosno vratilo četiri sa zupčanicima u kontaktu sa uljem, a nije ga moguće prenijeti do ulaznog. Dodavanjem sistema za ubrizgavanje ulja sa bakrenim cijevima ulje bi se dovodilo do potrebnih dijelova, te izbjeglo moguće zaribavanje.

Drugi dio je konstruiranje reduktora, odnosno njegovog kućišta. U to se ubrajaju oblik, dimenzije, postolje, vijci, uljokaz, odušak i ispus ulja. Također, potrebne su nam i brtve (o-prstenovi) za slijepe poklopce i poklopce sa otvorom, dvije radijalne brtve, uskočnici raznih dimenzija i prstenasti vijci Na obje strane kućišta u samom dnu urezana su dva kanala za dodatne o-brtve koje sprečavaju eventualno curenje. Materijal od kojega ćemo izraditi kućište je NL 700 koji je ujedno veoma čvrst pošto mora izdržati vrlo velike napore. U ovoj fazi smo ujedno i konstruirali vratila sa zupčanicima kako bi jednostavnije dimenzionirali kućište.

## 10. ZAKLJUČAK

Kako bi započeli s proračunom reduktora potrebno je bilo odrediti nekoliko parametara a to su moment, prijenosni omjer i brzina vrtnje za svako vratilo. Nakon dobivanja potrebnih vrijednosti kreće proračun reduktora za prvi stupanj, a iste formule vrijedile su za ostala dva. U proračunu za svaki stupanj dobivene su bitne vrijednosti za zupčanike. i vratila uz odabir materijala. Prva vrijednost je razmak između osi vratila za određeni stupanj. Zatim slijede vrijednosti zupčanika, a neke od njih su: broj zubi, promjeri preko glave, diobeni promjer, širina zupčanika i drugi. Kada smo dobili sve vrijednosti za pojedini stupanj prelazimo na kontrolni proračun kako bi se zadovoljili svi bitni parametri, te odabiremo potrebno ulje za podmazivanje. Isti postupak ponavljamo za svaki stupanj. Slijedio je izračun minimalnih promjera vratila, odabir ležajeva i na kraju odabir uložnih pera kako bi se gonjeni zupčanici mogli ugraditi na vratila, te ujedno priključiti izvor i uređaj koji pogonimo. Zatim odabiremo materijal i dizajn kućišta uz odabir elemenata kao što su vijci, brtve, odušnik, uskočnici i o-prstenovi.

Reduktor je izrađen na što jednostavniji način a da zadovoljava potrebne uvjete rada.

## 11. Popis literature

[1] – Siminiati Dubravka, Vrcan Željko: *Jednostupanjski zupčani reduktor, Elementi strojeva 2, Stručni studij strojarstva*

[2] – [SKF kalkulator](#)

[3] – Kraut Bojan: *Strojarski priručnik, 9. hrvatsko ili srpsko izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb*

## 12. Sažetak

Dobiven zadatak je konstruiranje vertikalnog trostupanjskog reduktora sa uparenim zupčanicima. Postupak konstruiranja odvija se po stupnjevima u ovom slučaju tri, a svaki stupanj sastoji se od projektnog i kontrolnog proračuna. U projektnom proračunu dobivamo dimenzije zupčanika s razmakom osi, a u kontrolnom provjeravamo ako vrijednosti odgovaraju određenim parametrima. Uz to odabire se materijal za vratila i zupčanike (Č5421) promjeri vratila, ležajevi, uložna pera, uskočnici i materijal kućišta (NL700) sa svim potrebnim dodacima. Sva vratila i zupčanci dobiveni su kovanjem, a dodatno obrađeni tokarenjem, glodanjem, brušenjem i bušenjem. Kućište je lijevano u dva dijela sa naknadno dodanim sustavom za podmazivanje zupčanika.

**Ključne riječi:** vertikalni trostupanjski reduktor sa uparenim zupčanicima, proračun, kućište, vratila, zupčanci, ležajevi, uskočnici,

## 12. Summary

The task we got was to construct a three-stage vertical reduction gear with paired gears. The procedure was made in stages, in this case three. Each stage consists of project and control calculations. In the projecting calculation we get the gear dimensions and shaft spacing and in the control calculation we figure out if the obtained values match the requirements. In addition we select the material for the shafts and gears (Č5421), calculate the shaft diameters, choose the correct bearings, pins, safety rings and the housing material (NL700) with all accessories needed. The shafts and gears are forged and then turned, milled, grinded and drilled. The case was cast made in two pieces with later added gear lubrication system.

**Keywords:** three-stage vertical reduction gear with paired gears, calculation, case, shafts, gears, bearings, safety rings,



## **14. Prilozi**

1. Sklopni crtež – trostupanjski vertikalni reduktor sa uparenim zupčanicima
2. Radionički crtež lijevog dijela kućišta
3. Radionički crteži vratila i zupčanika
4. Gearpac ispisi
5. Ležajevi sa specifikacijama